

PERILAKU KOROSI RETAK TEGANG *STAINLESS STEEL* 304 DALAM LINGKUNGAN ASAM SULFAT AKIBAT *PRESTRAIN*

Mohammad Badaruddin, Ahmad Suudi, dan Arinal Hamni

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung 35145, Indonesia

E-mail: m_badra03@yahoo.com

Abstrak

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh *prestrain* terhadap perilaku korosi retak tegang *stainless steel* AISI 304 dalam larutan H_2SO_4 konsentrasi 10% dengan pembebanan kantilever statis (ASTM E-1681). *Prestrain* dilakukan dengan meregangkan spesimen hingga mencapai regangan merata 5% dan 10% diatas tegangan luluh bahan, menggunakan *servopulser* UTM 9506 dengan kontrol kecepatan 0,3 mm/sec. Hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen dengan 5% *prestrain* lebih cepat mengalami kegagalan daripada spesimen 10% *prestrain* dan tanpa *prestrain*. Hal ini disebabkan menurunnya keuletan dan periode inkubasi yang singkat. Perubahan defleksi hanya dapat diamati pada pembebanan 20% tegangan luluh bahan. Retak *intergranular* ditemukan pada spesimen 10% *prestrain* pada pembebanan statis 616 MPa. Sedangkan pada spesimen 10% *prestrain* ditemukan retak *transgranular* pada pembebanan statis 554,4 MPa. Retak kombinasi ditemukan pada spesimen 5% *prestrain* pada pembebanan statis 369,6 MPa. Semakin tinggi densitas dislokasi pada lapisan permukaan akibat deformasi plastis, semakin sulit difusi hidrogen pada ujung retak. Konsekuensinya, periode inkubasi dapat diperlama..

Abstract

Stress Corrosion Cracking Behavior of Stainless Steel 304 in the Sulfuric Acid Environment Due to Prestrain. The aim of research is to investigate the effect of *prestrain* on the stress corrosion cracking behavior of AISI 304 stainless steel in the sulfuric acid of 10% concentration under the static cantilever loading according to ASTM E-1681 standart. The specimen of 304 Stainless steel was strain up over the yield strength until reaching the uniform strain of 5% and 10% using *servopulser* UTM 9506 under the displacement control of 0,3 mm/sec. The results of test show that the *prestrain* of 5% specimen is faster failure than both of the *prestrain* of 10% and un*prestrain* specimen. It was caused by both of the decrease of ductility and the short incubation period. The change of deflection could be only recorded under the loading 20% of yield strength. *Intergranular* crack was the *prestrain* of 10% specimen under the static loading of 616 MPa. Whereas, for the *prestrain* of 10% specimen *transgranular* crack was found under the static loading of 554,4 MPa. The *prestrain* of 5% specimen was mixed crack under the static loading of 369.6 MPa. Higher dislocation density on the layer surface due to plastic deformation with increasing the percentage of pre-strain, so more difficult hydrogen diffused into the crack tip. Consequently, The incubation period can be prolonged.

Keywords: *stress corrosion cracking, incubation period, prestrain, trans-inter granular cracking*

1. Pendahuluan

Banyak insiden yang terjadi menyangkut kemampuan bahan, seperti patahnya tiang konstruksi bangunan, patahnya tiang pancang pada pengeboran lepas pantai, tangki gas meledak, bocornya pipa, padahal beban yang diterima masih dalam batas yang diizinkan. Kejadian-kejadian ini menunjukkan bahwa bahan tersebut mengalami deformasi plastis yang besar (*prestrain*), sehingga bahan menjadi getas akibat manufaktur sebelumnya atau gempa bumi, seperti kejadian di Kobe

tahun 1994, yaitu bahan pada struktur bangunan mengalami kegagalan dalam ragam getas [1], sedangkan gempa bumi yang terbesar di Hanshin Awaji (Jepang), pada tahun 1995 menyebabkan jembatan dari struktur baja lasan dan bangunan ambruk akibat retak yang ditimbulkan pada bahan yang mengalami deformasi plastis lebih dari 15% [2].

Mengingat besar efek *prestrain* yang terjadi pada bahan struktur, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada bahan yang diaplikasikan pada lingkungan korosif

terutama perilakunya terhadap korosi retak tegang (SCC). Korosi retak tegang (SCC) adalah peristiwa pembentukan dan perambatan retak dalam logam yang terjadi secara simultan antara tegangan tarik yang bekerja pada bahan tersebut dengan lingkungan korosif. Proses korosi retak tegang (SCC) dapat terjadi dalam beberapa menit jika berada pada lingkungan korosif atau beberapa tahun setelah pemakaiannya. Hal ini terjadi karena adanya serangan korosi terhadap bahan. Korosi retak tegang (SCC) merupakan kerusakan yang paling berbahaya, karena tidak ada tanda-tanda sebelumnya.

Tercatat beberapa peneliti yang telah melakukan penelitian menyangkut korosi retak tegang, diantaranya; Badaruddin, M. [3], korosi intergranular terjadi pada baja karbon rendah dalam lingkungan air laut, terjadi pada pembebanan 70% di atas tegangan luluh bahan. James D. Fritz, dkk. [], melakukan penelitian terhadap baja paduan 6% Mo (UNS NO8367), pada lingkungan air laut pada temperatur yang berbeda dengan spesimen uji U-bend. Hasil pengujian yang didapat menunjukkan bahwa pada temperatur di atas 120°C , SCC terjadi hanya bergantung dari kandungan kloridanya, dengan bentuk perpatahan yang diketahui adalah transgranular yang bercabang. Kritzler [5], melakukan penelitian pada *stainless steel* fasa austenit. Kesimpulan yang dihasilkan menunjukkan bahwa ketahanan material terhadap korosi retak tegang yang terjadi sangat signifikan terhadap beban yang diberikan, dimana waktu proses pencelupan pada larutan 42% MgCl_2 pada temperatur 145°C , dapat memperpanjang umur korosi retak tegang dari 33 jam menjadi 1000 jam pada pembebanan 70% dari tegangan luluh bahan, sedangkan pada beban 90% peningkatan yang terjadi tidaklah signifikan.

Pada tahun 1998, Zhang [6] melakukan penelitian tentang pengaruh *ion borate* terhadap korosi retak tegang pada material *stainless steel* 304 (UNS30400) yang disensitisasi pada *sodium borate* ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) cair, pada temperatur 95°C yang diamati pada percobaan *Slow Strain Rate Testing* (SSRT) dengan menggunakan sistem observasi dinamik. Pengaruh inhibitor dari *ion borate* ($\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$) pada pemicu retak dihasilkan dari efek penahanan, pada saat pengasaman lokal membentuk lapisan pelindung. Konsentrasi ($\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$) yang tersedia tidak menunjukkan pengaruh inhibitor pada kecepatan retak (CF). Ion hidroksil (OH^-) juga memicu retak dengan mengikuti distribusi probabilitas eksponen dan kecepatan retak diikuti distribusi probabilitas Weibull.

Yunovich [7] melakukan penelitian tentang pengaruh pengerjaan dingin korosi retak tegang pada baja karbon API X52 dalam lingkungan *bicarbonate* cair, dengan membandingkan spesimen tanpa takik yang di *cold working*. Hasil menunjukkan bahwa pengerjaan dingin dapat merusak ketahanan baja karbon terhadap korosi retak tegang pada lingkungan cair hingga sampai kegagalan minimum pada 20% dari regangan.

D. Kirk dan P.E Render [8] melakukan penelitian pada korosi retak tegang baja karbon dengan menggunakan spesimen U-bend yang direndam pada larutan asam sulfat 30% dan dipanaskan sampai dengan 67°C . Retakan terjadi pada tegangan tinggi yaitu 90% dari batas elastis logam, struktur mikro dan perlakuan panas sangat mempengaruhi baja terhadap korosi retak tegang.

Adapun hujan asam merupakan salah satu media lingkungan korosif yang sering terjadi di sekitar kita yang mengakibatkan terjadinya korosi pada logam, karena unsur-unsurnya (kandungan asam) memicu terjadinya korosi. Asam yang terkandung di dalamnya yaitu asam sulfat (H_2SO_4) dan asam nitrat (HNO_3) [9].

Pada dasarnya *prestrain* adalah proses deformasi dingin yang menimbulkan dislokasi struktur bahan yang mempengaruhi perilaku perpatahan liat bahan tersebut [10]. Efeknya akan meningkatkan tegangan luluh dan tegangan tarik material [11].

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efek *prestrain* yang menimbulkan deformasi plastis pada *stainless steel* 304 terhadap perilaku korosi retak tegang (SCC) dalam lingkungan asam sulfat (H_2SO_4).

2. Metode Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *stainless steel* 304 dengan sifat mekanik awal adalah $\sigma_u = 515\text{ MPa}$, $\sigma_y = 285\text{ MPa}$, dan elongasi = 30%. *Stainless steel* 304 berbentuk lembaran dengan ketebalan 5 mm kemudian dipotong searah pengerolan logam dengan ukuran panjang 200 mm dan lebar 40 mm. Selanjutnya diberi *prestrain* 5% dan 10%, dengan cara memberikan tegangan diatas tegangan luluh bahan hingga mencapai regangan merata sebesar 5% dan 10% dengan mesin uji tarik servopulser UTM 9506. Proses ini dilakukan dengan kontrol *displacement* pada laju regangan 0,3 mm/sec.

Jumlah specimen yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 1.

Standar pengujian korosi retak tegang adalah standar ASTM E 168 [1]. Larutan yang digunakan sebagai lingkungan korosif adalah asam sulfat (H_2SO_4) dengan konsentrasi 10% yang diberikan dengan cara diteteskan di daerah takik (0,2 cc/det). Sedangkan pembebanan diberikan dengan variasi 20%-200% di atas tegangan luluh bahan.

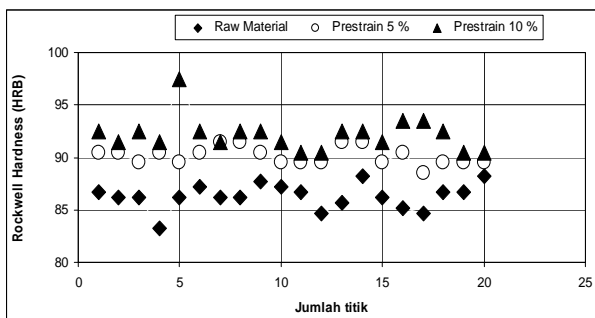
Tabel 1. Spesimen Uji Korosi Retak

Spesimen	Jumlah
Raw material	10
<i>Prestrain</i> 5%	10
<i>Prestrain</i> 10%	10

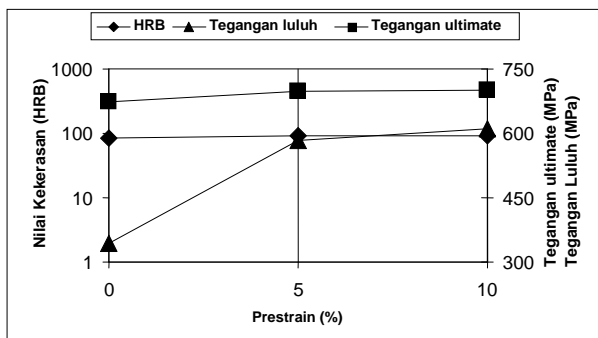
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Uji Mekanik. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan skala Rockwell dengan indenter 1/16 inchi pada pembebanan 100 kgf (Gambar 1).

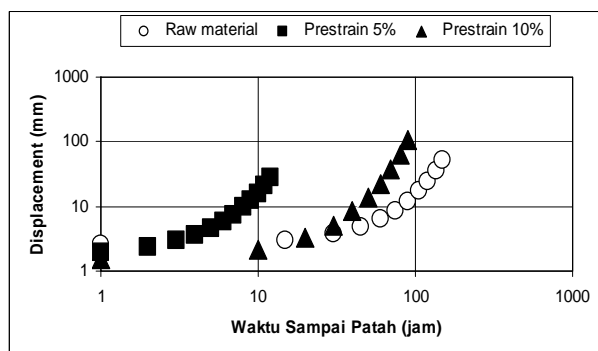
Pada Gambar 1 dan 2 menunjukkan perubahan sifat mekanik pada bahan yang telah mengalami *prestrain*, Regangan awal yang diberikan terhadap material akan mengakibatkan gerak dislokasi yang saling merintangi antar dislokasi, sehingga menimbulkan efek pengerasan regangan, sehingga sifat mekanik meningkat.



Gambar 1. Kurva perbandingan tingkat kekerasan



Gambar 2. Hubungan sifat mekanik (HRB, σ_u , dan σ_y) terhadap prosentase *prestrain*



Gambar 3. Hubungan displacement terhadap waktu sampai patah dengan $\sigma_{\text{stat}} = 369,6$ Mpa.

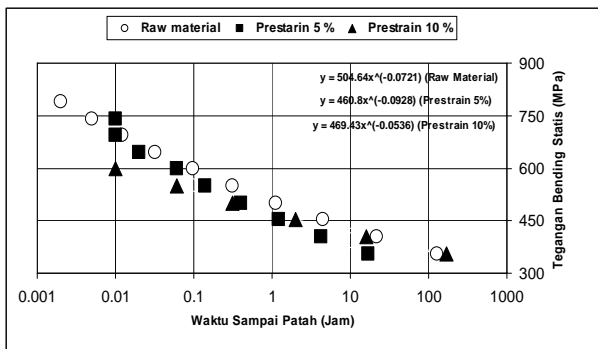
Hasil Uji Korosi Tegangan. Setelah dilakukan pengujian dengan pembebanan yang bervariasi diperoleh data yang tercatat pada *dial indicator* hanya pada pembebanan 20% di atas tegangan luluh, sedangkan pembebanan di atas tegangan luluh 20% sangat sulit tercatat karena cepatnya perubahan defleksi pada spesimen dan waktu hampir patah juga lebih cepat, hanya waktu awal (beban terpasang) dan waktu akhir (kondisi hampir patah) yang tercatat.

Perubahan defleksi lebih cepat terjadi pada spesimen *raw material* pada waktu 1 jam pertama. Besarnya masa inkubasi yang terjadi sebelum timbul retakan pada spesimen adalah 29,97 jam (spesimen *raw material*), 4,517 jam (*prestrain* 5%), dan 32,5 jam (*prestrain* 10%). Masa inkubasi adalah waktu untuk hidrogen yang bisa diserap dari larutan korosif untuk berdifusi hingga mencapai konsentrasi kritis pada permukaan bahan yang retak atau cacat.

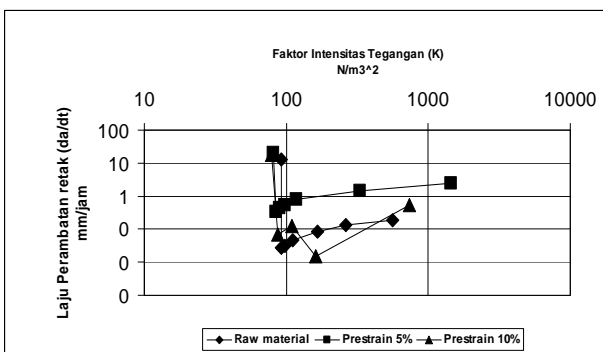
Pada spesimen *raw material* yang terjadi adalah spesimen masih dalam batas sifat elastisnya sehingga lebih cepat mengalami perubahan defleksi, namun masa inkubasinya cukup lama. Sedangkan spesimen *prestrain* 5% lebih cepat terjadi retakan awal (*crack initiation*) karena sifat elastis bahan yang menurun, namun efek pengerasan regangan belum begitu signifikan, sehingga masa inkubasi yang terjadi lebih cepat. Untuk spesimen *prestrain* 10% masa inkubasi yang terjadi lebih lama karena besarnya prosentase deformasi plastis yang diberikan membuat bahan mengalami pengerasan regangan (*strain hardening*) merata pada bahan [4]. Dengan kata lain, deformasi plastis yang berlebihan dapat meningkatkan besarnya densitas dislokasi pada lapisan permukaan. Semakin besar densitas dislokasi pada lapisan permukaan, semakin besar peluang untuk menjebak hidrogen dari larutan H_2SO_4 agar tidak berdifusi kedalam bahan, sehingga periode inkubasi dapat diperlama [13].

Dari Gambar 4 menunjukkan besarnya tegangan bending statis yang diberikan semakin mempercepat terjadi kegagalan spesimen. Waktu gagal tercepat terjadi pada spesimen *prestrain* 5% dengan pembebanan 20%-60% di atas tegangan luluh, dan *prestrain* 10% dengan pembebanan 80%-200%. Pada spesimen 5% hal itu disebabkan karena faktor masa inkubasi lebih cepat bereaksi. Sedangkan pada *prestrain* 10% terjadi karena besarnya deformasi plastis yang diberikan dan masa inkubasi yang berlangsung.

Gambar 5 menunjukkan hubungan intensitas tegangan dan laju perambatan retak. Pada kondisi awal pengujian laju perambatan retak meningkat dan faktor intensitas tegangan menurun drastis. Namun setelah faktor intensitas tegangan mencapai $100 \text{ N/mm}^{3/2}$, retak yang terjadi akibat pembebanan mulai mencapai kondisi konstan, dimana masa inkubasi sudah mulai terjadi dan



Gambar 4. Hubungan tegangan bending statis dengan waktu sampai patah



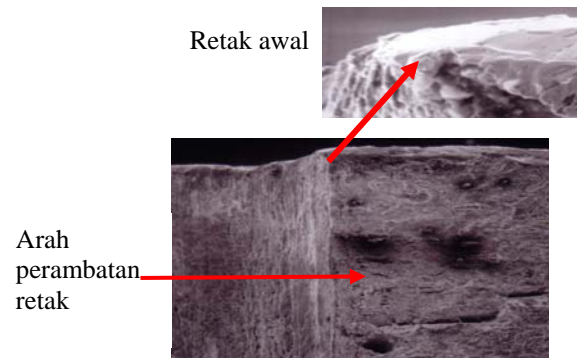
Gambar 5. Hubungan faktor intensitas tegangan dengan laju perambatan retak pada $\sigma_{statis} = 369,6$ Mpa.

ujung retak mengalami kondisi plastis. Seiring dengan waktu dan terkorosinya permukaan retak akibat larutan asam, retak mulai merambat hingga mencapai ukuran kritis, menyebabkan spesimen patah. Laju perambatan retak terbesar terjadi pada spesimen *prestrain* 5% selama 20,193 mm/jam.

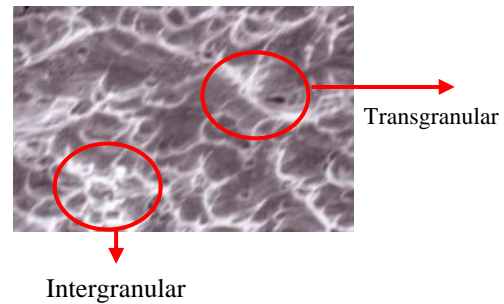
Hasil Uji Fraktografi. Gambar 6 dan 7 menunjukkan fraktografi dari arah perambatan retak dan retak inisiasi pada spesimen *prestrain* 5% dan *prestrain* 10% dengan $\sigma_{statis} = 369,6$ Mpa dan 616 Mpa.

Pada spesimen *prestrain* 5% terjadi retakan intergranular dan transgranular, sedangkan *prestrain* 10% mengalami retakan intergranular (gambar 8). Retakan transgranular terjadi akibat adanya deformasi plastis yang besar, deformasi plastis ini menurunkan sifat elastis bahan.

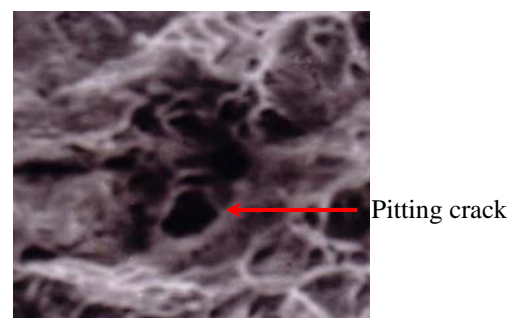
Efek deformasi plastis ini membuat perubahan butiran struktur menjadi lebih besar, reaksi dari bahan dan lingkungan lebih banyak terjadi di butir itu sendiri sehingga terjadi penggetasan butir. Sedangkan intergranular terjadi akibat adanya deformasi plastis, oksidasi yang terjadi lebih banyak disekitar batas butir. Korosi yang terbentuk dari reaksi lingkungan dan bahan



Gambar 6. Fraktografi dari arah perambatan retak (60X) dan crack inisiasi (745X) pada spesimen *prestrain* 5% dengan $\sigma_{statis} = 369,6$ MPa pada displacement 4,107 mm.



Gambar 7. Fraktografi patahan intergranular dan transgranular pada spesimen *prestrain* 5% (1000X) dengan $\sigma_{statis} = 369,6$ MPa dan waktu gagal 11,55 jam



Gambar 8. Fraktografi patahan intergranular (SEM 1000X) pada spesimen *prestrain* 10% dengan $\sigma_{statis} = 616$ MPa dengan waktu gagal 10, 15 jam

serta adanya tegangan yang diberikan memicu terjadi korosi retak tegang (SCC) juga korosi celah (pitting). Korosi retak tegang yang terjadi akibat atom-atom hidrogen yang berdifusi ke dalam spesimen pada ujung takik, [14]. Larutan H_2SO_4 pada pH rendah dapat

meningkatkan konsentrasi hidrogen pada ujung retak sehingga hidrogen akan terakumulasi pada daerah ujung retak yang dapat mempercepat terbentuknya retak.

4. Kesimpulan

Berdasarkan dari pembahasan sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu: Spesimen *raw material* lebih cepat mengalami defleksi pada 1 jam pertama dibanding spesimen *prestrain* 5% dan 10%. Pada spesimen *prestrain* 5% lebih dulu terjadi retakan dibanding dengan spesimen *prestrain* 10% dan *raw material* pada 20% di atas tegangan luluh. Laju perambatan retak semakin besar dengan diikuti peningkatan intensitas tegangan. Hal ini di akibatkan masa inkubasi yang mempercepat terjadinya korosi pada spesimen. Waktu gagal tercepat terjadi pada spesimen *prestrain* 5% dengan besar tegangan 20%-60% di atas tegangan luluh, dan *prestrain* 10% dengan besar tegangan 80%-200% di atas tegangan luluh. Retakan yang terjadi adalah intergranular pada spesimen *prestrain* 10% dengan $\sigma_{\text{statis}} = 616$ Mpa, retakan transgranular pada spesimen *prestrain* 10% dengan $\sigma_{\text{statis}} = 492,8$ Mpa dan retakan gabungan pada spesimen *prestrain* 5% dengan $\sigma_{\text{statis}} = 369,6$ Mpa.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan kepada DP2M DIKTI Departemen Pendidikan Nasional Indonesia atas dukungan dana yang diberikan, dalam proyek penelitian melalui penelitian dosen muda No. kontrak: 010/SP3/PP/DP2M/11/2006, tanggal 1 Februari 2006.

Daftar Acuan

- [1] Zhang, Y.L. Chiang, M.A. Streicher, NACE International 39 (1998) 114-119
- [2] Sivaprasad, S, Tarafder, S, Ranganath, V.R, Das, S.K, Ray, K.K, J. Met.Mat.Trans, 33A(2001)3731-3739.
- [3] Badaruddin M, dan Sugiyanto, J. Tek. Mesin Univ. Kristen Petra Surabaya (2005) 11-14.
- [4] A. Cigada, B. Mazza, P. Pedferri, G. Salvago, D. Sinigaglia and G. Zanini, J. Corrosion Science, 22/6 (1982) 559-578.
- [5] Kirk, D, and P.E. Render, *Int. Con. Of Shot Peening 7th*, Warsaw-Poland (2001) 167-176.
- [6] Yunovich, Josephic, NACE international 1998.
- [7] Tateishi, T, Hanjin, T, J. Struct. Mech. Earthquake Eng, JSCE 59, I-43 (2003) 243-261.
- [8] D. J., Fritz, Ronald. J. Gerlock, J. Desalination, 13/5 (2001) 93-97.
- [9] Zdravko P, Masao Toyoda, Int. Conf. 39th, Exp. Stress Analysis, Tabor-Czech Republic (2001)46-52.
- [10] Sakata, Kawasaki Steel Tech. Report, 48 (2003)
- [11] Qiao, L, Y. L. Huang, J.Master Science, 25 (1998) 47-51.
- [12] ASTM E-1681, ASTM International USA (2004) 1-15.
- [13] Watanabe,Y., and Hasegawa, N., *Int. Con. Of Shot Peening 7th*, Warsaw-Poland (2001) 841-846.
- [14] Kritzler, J. *Int. Con. Of Shot Peening 7th*, Warsaw-Poland (2001) 142-147.